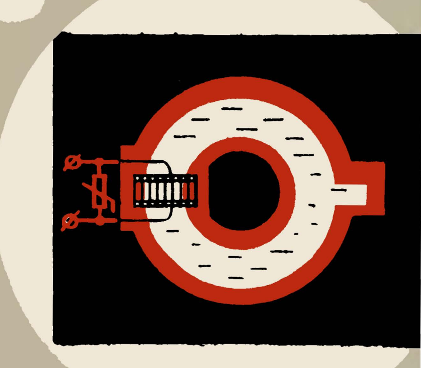


В. А. ЛОМАНОВИЧ
И. В. СТРИЖЕВСКИЙ



ХИМОТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

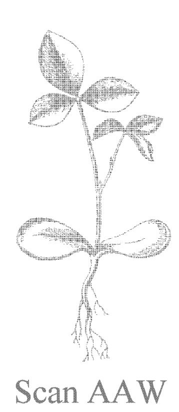


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

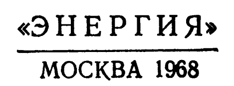
Выпуск 665

В. А. ЛОМАНОВИЧ, И. В. СТРИЖЕВСКИЙ

ХИМОТРОННЫЕ ПРИБОРЫ







«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1968

6П2.151
Л 74

УДК 621.35

Ломанович В. А., Стрижевский И. В.

Л 74 Химотронные приборы. М., «Энергия», 1968.

32 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 665)

Брошюра знакомит читателей с новой областью прикладной электрохимии — химотроникой, возникшей в последние годы на стыке электрохимии и электроники. Приводятся описания электрохимических диодов и интеграторов, химотронных преобразователей неэлектрических сигналов и усилителей. Предназначена для подготовленных радиолюбителей.

3-4-5

333-67

6П2.151+541

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный уровень технического прогресса во многих областях техники в значительной степени обусловлен качеством электронной аппаратуры. Совершенствование ее идет как по пути создания новых схем, так и новых конструкций. Однако возрастающая сложность и объем задач, решаемых с помощью электронных приборов, постоянно ведут к повышению предъявляемых к ним требований.

В первую очередь это связано с увеличением надежности и уменьшением габаритов приборов, их веса, стоимости и потребляемой мощности. В ряде случаев к электронной аппаратуре, используемой в диапазоне низких и инфранизких частот, предъявляют специальные требования. Поэтому вполне естественным является поиск принципиально новых технических решений для создания более экономичных, чувствительных, дешевых и простых приборов, чем электронные лампы и транзисторы. С этой целью исследователи обратились к электрической проводимости в жидкостях для создания приборов самых различных назначений.

На стыке электрохимии, электроники и автоматики возникает новая отрасль науки и техники — химотроника, которая призвана создавать электрохимические элементы и приборы.

К электрохимическим элементам и приборам (электрохимическим преобразователям или химотронам) относят приборы, принцип действия которых основан на использовании электрохимических процессов, протекающих на электродах, погруженных в электролиты или полярные жидкости.

В последние годы разрабатываются электрохимические элементы и приборы самого различного назначения: диоды, триоды, интеграторы, датчики механических и акустических воздействий, управляемые резисторы, стабилизаторы микротоков, усилители постоянного тока, счетчики машинного времени и др.

В определенных областях применения эти приборы обладают преимуществами по сравнению с электронными приборами, так как химотронные приборы в ряде случаев позволяют снизить ток потребления, даже по сравнению с полупроводниковыми, в 100—1 000 раз и дают возможность получить значительно большую селективность, чувствительность и точность.

ВВЕДЕНИЕ

При растворении некоторые вещества распадаются (диссоциируют) на ионы независимо от того, проходит через раствор электрический ток или нет. Молекулы кислот распадаются на положительные ионы водорода и отрицательные ионы кислотного остатка. Основания — на положительные ионы металла и отрицательные гидроксильные ионы. Соли диссоциируют на положительные ионы металла и отрицательные ионы кислотного остатка. Рассмотрим процесс образования ионов в электролите. Распад молекул вещества на заряженные ионы происходит под воздействием растворителя, разъединяющего молекулы растворяемого вещества. Объясняется это особой структурой молекул растворителей. Их обычно называют диполями, так как центры положительных и отрицательных зарядов у них значительно смещены по отношению друг к другу. Подобная структура сопровождается высокой диэлектрической проницаемостью вещества, т. е. его способностью к ослаблению напряженности поля, создаваемого в нем электрическими зарядами. Обычная вода—прекрасный растворитель, обладающий высокой диэлектрической проницаемостью. При растворении в воде происходит значительное ослабление молекулярных и ионных связей внутри вещества. Такие вещества, как сахар, в ней распадаются на молекулы, другие же— на отдельные ионы, первые электрический ток не проводят, вторые являются электролитами.

Рассмотрим растворение молекулы поваренной соли (хлористого натрия) в воде. Под воздействием электрических полей, создаваемых ионами натрия и хлора, полярные молекулы воды (диполи, изображенные на рисунке в виде овалов), притягиваясь, ориентируются около них (рис. 1,*а*). Но так как, диполи в свою очередь притягивают ионы натрия и хлора, то, естественно, ослабляют связь между ними. Окружив ионы Na^+ и Cl^- гидратной оболочкой, вода препятствует обратному соединению этих ионов в молекулы поваренной соли. Процесс этот носит название гидратации ионов (рис. 1,*б*).

При отсутствии внешнего поля движение ионов в растворе будет таким же беспорядочным, как хаотическое тепловое движение свободных электронов в металле. При подобном движении электрических зарядов (электронов или ионов) их поля взаимно компенсируются и ток в проводнике равен нулю. При воздействии на раствор внешнего электрического поля, помимо хаотического движения, возникает упорядоченное перемещение ионов в направлении поля. Следовательно, направленное движение становится преобладающим, и ток в цепи будет расти с увеличением внешнего поля.

Но по скорости движения ионы в растворе в тысячи раз уступают самым «ленивым» электронам в металле. Виною этому очень

большие размеры ионов, окруженных, к тому же, оболочкой из полярных молекул растворителя (в воде — гидратной оболочкой).

Электропроводность таких растворов зависит от концентрации диссоциированных ионов, абсолютной скорости их движения и температуры раствора. С увеличением концентрации раствора электропроводность его возрастает, но при этом все больше сказывается взаимное притяжение ионов, и при высоких концентрациях ионные связи в молекулах начинают восстанавливаться, и количество свободных ионов, способных переносить электрические заряды, падает, т. е. уменьшается степень диссоциации. Следовательно, электропроводность раствора в этом случае снижается, и дальнейшее повышение концентрации вызывает уже не уменьшение, а увеличение его сопротивления электрическому току.

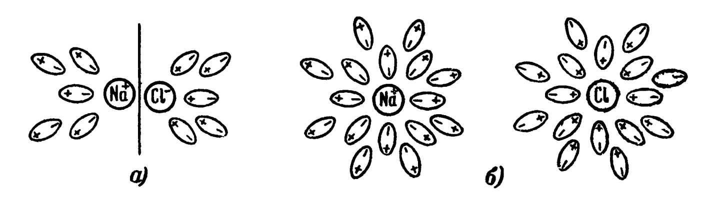


Рис. 1. Распад на ионы молекулы поваренной соли под действием молекул воды.

а — диссоциация молекул поваренной соли; *б* — ионы натрия и хлора с гидратной оболочкой.

Заметим, что при прохождении тока через раствор ионы на электроде либо отдают электроны (ионы окисляются), либо их принимают (восстановление ионов). Другими словами, электролиз всегда связан с окислительно-восстановительными процессами. Например, при прохождении тока через раствор медного купороса ионы меди теряют свой заряд и превращаются в нейтральные атомы, как только войдут в соприкосновение с катодом, обладающим избытком электронов. Иными словами, на катоде все время будет происходить восстановительный процесс. На аноде в то же время идет окислительный процесс. На нем выделяется газообразный кислород в результате разложения воды, водород которой соединяется с отрицательными ионами кислотного остатка, образуя серную кислоту H_2SO_4, либо растворяется сам анод. Первый случай характерен для инертного электрода, материал которого не участвует в электрохимической реакции (например, для угольного электрода).

Во втором случае состав электролита остается прежним, так как при этом происходит растворение медного анода (на аноде медь переходит в раствор, а на катоде выделяется такое же количество ее). Значит, медный анод непрерывно пополняет убыль ионов меди, осаждающихся при электролизе на катоде.

В гальванических элементах электрический ток так же получают в результате окислительно-восстановительной реакции, идущей на его электродах.

В зависимости от состава электролита и материала электродов при электролизе могут происходить самые различные химические превращения. Из приведенных примеров окислительно-восстановительных процессов, идущих при прохождении электрического тока

через электролит, мы видим, что либо электролит, либо сами электроды претерпевают изменения. Однако нас в дальнейшем в основном будут интересовать только такие окислительно-восстановительные процессы, при которых не происходит ни изменения поверхности электродов (они служат только для передачи электронов), ни изменения состава или объема электролита. Оказывается, что существуют и такие окислительно-восстановительные реакции, когда процесс превращения одних ионов в другие полностью компенсируется обратным процессом, происходящим на другом электроде. Такие реакции известны под общим названием обратимых окислительно-восстановительных.

Рассмотрим последовательно все изменения, происходящие в приэлектродном пространстве во время электролиза. Пока на электродах не появится разность потенциалов, концентрация растворенных веществ в электролите будет одинаковой во всех точках. При электролизе это равновесие нарушается, так как возникает разность концентраций растворенных веществ у поверхности электродов и в глубине раствора. Следствием этого будет диффузия (перемещение ионов от области с большой концентрацией к области с меньшей) и возникновение у поверхности электродов пограничного диффузионного слоя, в котором концентрация электролита будет уменьшаться по мере приближения к поверхности электродов. Это связано с тем, что в приэлектродном пространстве идет непрерывный «расход» диссоциированных (свободных) ионов из электролита и концентрация их падает по мере приближения к поверхности электрода. Толщина диффузионного слоя, в котором сказывается местное измерение концентрации электролита, довольно велика (доли миллиметра).

Помимо диффузионного движения ионов во время электролиза возможно также их конвективное и миграционное перемещение в электролите. Первое связано с конвекцией (перемешиванием) жидкости, вызываемой тепловыми явлениями. Под вторым подразумевается движение заряженных ионов в направлении, определяемом знаком поля. Таким образом, мы различаем три способа подведения ионов к электродам: диффузию, конвекцию и миграцию ионов.

В самом электродном процессе мы можем наблюдать три фазы: подвод ионов из глубины раствора к электродам, восстановление или окисление ионов на электродах и отвод продуктов реакции от электродов в глубь раствора.

Скорость восстановления и окисления ионов возрастает с увеличением силы тока, проходящего через электролит. При определенной плотности тока наступает момент, когда все ионы, находящиеся в этот момент на поверхности электродов, будут реагировать с ними. Поэтому концентрация ионов на поверхности электродов станет равной нулю, и дальнейшее увеличение напряжения на электродах ничего не изменит. Скорость диффузионных процессов теперь уже будет недостаточной, чтобы обеспечить своевременную доставку к электродам реагирующих веществ и отвод от них продуктов реакции. Максимальный ток, обеспечиваемый скоростью диффузии, называется предельным током диффузии.

Вспомним теперь о перепаде концентраций раствора, распределении в нем диссоциированных ионов и значительном уменьшении концентрации в приэлектродном диффузионном слое во время электролиза. Очевидно, что если каким-либо способом увеличить перемешивание (конвекцию) жидкости, то распределение концентраций в электролите изменится, толщина диффузионного слоя станет мень-

ше и скорость доставки ионов к электродам значительно возрастет. Естественно, что при этом предельный ток диффузии также увеличится. Достигнуть этого можно путем механического перемешивания или нагревания электролита.

Следует заметить, что с повышением температуры происходит увеличение скорости движения ионов в электролите. Поэтому увеличение электропроводности электролитов при нагревании является характернейшим отличием проводников второго рода от металлов (проводников первого рода), у которых с повышением температуры увеличивается сопротивление, а не проводимость.

Знакомясь с процессами, происходящими в химотронах, остановимся на явлении поляризации, т. е. появлении между электродами химотронов некоторой собственной разности потенциалов, по своему знаку противоположной напряжению, поступающему на прибор из внешней цепи (т. е. химотрон сам превращается в источник встречной э. д. с.).

В процессах электролиза принято различать химическую и концентрационную поляризацию. Химическую поляризацию мы наблюдаем в том случае, когда затруднена реакция разряда ионов на электроде. Концентрационная поляризация возникает во время электролиза из-за различия концентраций электролита в анодном и катодном пространстве. В результате образуется так называемый концентрационный элемент, в котором электрический ток возникает за счет разности концентраций ионов у катода и анода. Очевидно, что концентрационная поляризация значительно снижается при искусственном перемешивании электролита.

Часто при конструировании различных химотронных приборов требуется исключить или, возможно, ограничить какой-нибудь из способов подведения ионов к электродам. Если нужно максимально ограничить перемешивание жидкости в междуэлектродном пространстве, устанавливают капиллярные трубки или пористые перегородки. Этим совершенно исключают конвективное движение раствора, не создавая в то же время существенного препятствия для миграционного перемещения ионов в растворе. Если необходимо ограничить миграционное движение ионов в электролите, его составляют таким образом, чтобы лишь незначительная его часть принимала активное участие в электродном процессе.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ДИОДЫ

Электрохимический диод состоит из электродов, погруженных в раствор, содержащий как восстановленные, так и окисленные формы ионов.

Электродами в этих элементах могут быть любые металлы, инертные к используемому раствору. Классическим примером материала для электродов может служить платина.

Электролит должен образовать с электродами обратимую окислительно-восстановительную систему. Для электродов из платины электролитом могут служить растворы: хинон — гидрохинон, иод — иодид, двухвалентное железо — трехвалентное железо и др. Если к электродам приложить внешнее напряжение, то положительно заряженные ионы — катионы будут перемещаться в электролите к отрицательному электроду — катоду, а отрицательно заряженные ионы — анионы будут перемещаться к положительному электроду — аноду.

Таким образом, получается замкнутая электрическая цепь, во внешнем участке которой ток определяется движением электронов, а внутри ячейки — движением ионов. При неизменных величинах приложенного напряжения и сопротивления внешней цепи величина тока будет определяться суммой положительных и отрицательных ионов, разряжающихся на электродах. Таким образом, величина тока будет определяться скоростью электродных процессов. В зависимости от вида подведения ионов различают три составляющих тока (диффузионный ток, конвективный ток и ток миграции).

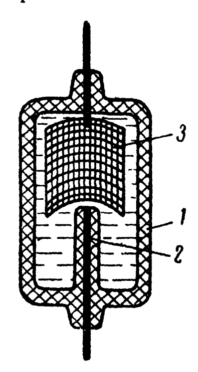


Рис. 2. Химотронный диод.
1 — корпус; *2* — малый электрод; *3* — большой электрод.

Рассмотрим обратимую окислительно-восстановительную систему иод — иодид с платиновыми электродами при концентрации иодистого калия в растворе, во много раз большей концентрации иода. Для уменьшения тока миграции электролит составлен так, что лишь незначительная его часть принимает активное участие в электродном процессе. Следовательно, избыточное количество иодистого калия и будет тем электролитом, который не участвует в электродном процессе.

При прохождении тока через такую систему на электродах происходят следующие реакции:

$$\text{на катоде } J_2 + 2e \rightarrow 2J^-;$$

$$\text{на аноде } 2J^- - 2e \rightarrow J_2.$$

Но так как нейтральная молекула иода, обычно соединяясь с ионами иода, образует ион триодида ($J_2 + J^- \rightleftarrows J_3^-$), то реакции на электродах можно представить в таком виде:

$$\text{на катоде } J_3^- + 2e \rightarrow 3J_3^-;$$

$$\text{на аноде } 3J^- - 2e \rightarrow J_3^-.$$

Следовательно, в результате диссоциации образуются положительные ионы калия, отрицательные ионы иода и ионы трииодида (молекулярного иода). Но только ионы иода и ионы трииодида будут носителями электрических зарядов.

Вышеприведенные обратимые реакции протекают в водных растворах только при напряжении ниже 0,9 *в*. При более высоком напряжении наряду с этими обратимыми процессами происходит разложение воды и газовыделение на электродах.

Если площади электродов равны между собой, а также равны концентрации $J^-{}_3$ и J^-, то характеристики диода должны быть одинаковы при любой полярности приложенного напряжения к электродам.

Однако при резко различных размерах поверхностей электродов и разном значении исходных концентраций реагирующих ионов в растворе ($J^-{}_3$ и J^-) вольт-амперная характеристика диода становится

резко асимметричной, т. е. такой прибор может быть использован как выпрямитель тока.

Устройство подобного диода показано на рис. 2.

Корпус диода изготовлен из химически стойкого изоляционного материала (стекло, пластмасса). Электроды выполнены из платины, причем поверхность электрода *2* много меньше поверхности электрода *3*.

На рис. 3 приведена вольт-амперная характеристика электрохимического диода.

При напряжении, приложенном к диоду, когда ионы с малой исходной концентрацией реагируют на малом электроде, через диод протекает незначительный обратный ток $I_{\text{обр}}$. При другой полярности приложенного напряжения ток возрастает, так как на малом электроде реагируют ионы с высокой концентрацией (прямой ток диода $I_{\text{пр}}$).

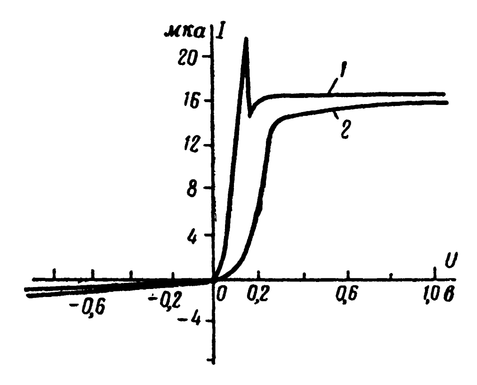


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика электрохимического диода для систем: *1* — иод — иодид; *2* — ферри — феррицианид калия.

Как видно на рис. 3, на вольт-амперной характеристике есть участки, на которых увеличение напряжения почти не приводит к изменению тока. Такие токи называются предельными. Предельный ток устанавливается в том случае, когда вблизи электрода объемная концентрация одного из реагирующих веществ становится ничтожно малой по сравнению с исходной. Вольт-амперная характеристика описываемого электрохимического диода на основе обратимой системы иод — иодид содержит участок с резким спадом тока, т. е. участок с отрицательным сопротивлением.

У диодов, основанных на других окислительно-восстановительных системах, участка с падающей характеристикой обычно не наблюдается.

При увеличении частоты приложенного к электрохимическому диоду напряжения коэффициент выпрямления довольно резко падает. Это происходит потому, что продукты электрохимической реакции за один полупериод приложенного напряжения не успевают отводиться диффузией от поверхности электрода в глубь раствора. А так как эти же продукты являются исходными для электрохимических

реакций, протекающих во второй полупериод, то это облегчает прохождение обратного тока.

Если даже взять радиус малого электрода несколько микрон, то и тогда диод можно использовать только до частоты несколько десятков герц. Уменьшение размера малого электрода естественно резко снижает величины прямого и обратного токов диода.

При необходимости увеличить значение рабочего тока или снизить время его установления один электрод делается подогревным.

На рис. 4 дана принципиальная схема электрохимического диода с электрическим подогревным электродом (катодом). В электролитическую ячейку *1* с электродом *2* вводят подогревный электрод *3*. От внешнего источника постоянного или переменного тока *4* подается напряжение, вызывающее нагрев катода.

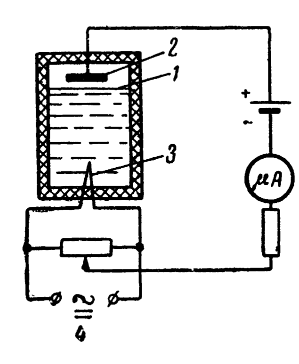


Рис. 4. Химотронный диод с электрическим подогревателем.

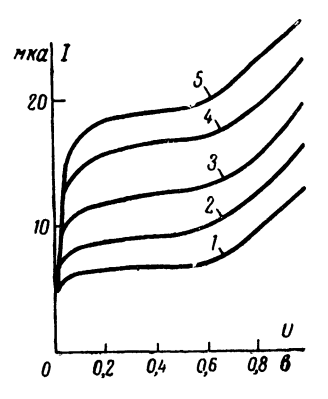


Рис. 5. Зависимость прямого тока химотронного диода от напряжения для плотности тока в цепи подогретого катода.

1 — без подогрева; *2* — 10 *а/мм²*; *3* — 20 *а/мм²*; *4* — 30 *а/мм²*; *5* — 40 *а/мм²*.

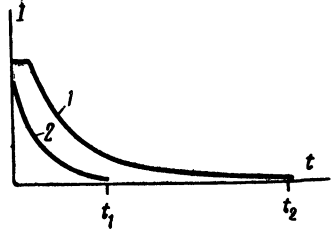
При подогреве катода значительно улучшаются условия диффузии в прикатодном пространстве, в результате чего увеличивается рабочий ток и уменьшается время его установления. На рис. 5 показана зависимость рабочего тока диода от напряжения. На рис. 6 показано влияние подогрева катода на время установления тока диода.

Характеристики диода резко зависят от температуры. Прямой и обратный токи возрастают примерно на 2,5—3% на 1° С. Нижний температурный предел работы электрохимических диодов во многом зависит от состава электролита. Если в качестве растворителя использовать органические полярные жидкости (ацетонитрил, метанол, этанол, пропионитрил), можно нижний температурный предел понизить в область отрицательных температур (от —40 до —60° С).

Наиболее эффективно электрохимический диод может быть использован как выпрямитель переменных электрических сигналов низких и инфракрасных частот малого уровня.

Рис. 6. Установление тока химотронного диода.

1 — без подогрева; 2 — при подогреве катода; $t_1=3$ *сек*; $t_2=12$ *сек*.



Электрохимический диод может быть использован для детектирования умножения и преобразования частоты.

Наличие участка с отрицательным сопротивлением на вольт-амперной характеристике диода дает возможность использовать его в схемах генераторов, усилителей, переключателей и в логических элементах. Участок вольт-амперной характеристики, на котором ток почти не зависит от приложенного напряжения (от 0,2 до 0,8 *в*), позволяет использовать диод в качестве стабилизатора малых постоянных токов.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАТОРЫ

Химотронные интеграторы по принципу их действия делят на два основных класса: диффузионные и твердофазные. Диффузионные электрохимические интеграторы могут быть двух-, трех- и четырехэлектродными. Наиболее простыми по устройству являются интегрирующие двухполюсники.

Электрохимический интегрирующий двухполюсник (рис. 7) состоит из корпуса *1*, внутренняя полость которого разделена на два отсека перегородкой *2*; по обе стороны от перегородки расположены

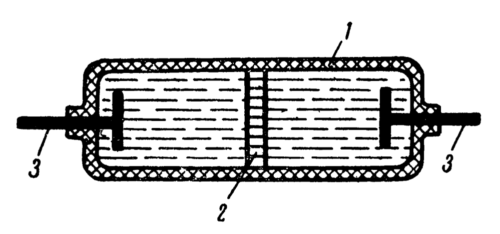


Рис. 7. Электрохимический интегрирующий двухполюсник.

электроды из инертного металла *3*, имеющие выводы для подключения внешнего напряжения. Перегородка обычно выполняется либо из пористого материала, либо из очень тонкой по сечению капиллярной трубки. Перегородка затрудняет перемешивание электролита между отсеками под действием диффузии и конвекции, но в то же время не препятствует прохождению ионов под действием электрического поля.

Внутренняя полость обоих отсеков корпуса заполняется одним и тем же раствором, образующим с инертным электродом обратимую окислительно-восстановительную систему.

Здесь может быть использована, например, ранее рассмотренная в диодах обратимая окислительно-восстановительная система иод —

иодид с платиновыми электродами. При прохождении тока между электродами ионы трииодида у катода восстанавливаются до иодида, а у анода иодид окисляется до трииодида. Так как концентрация иодистого калия в растворе превышает в сотни раз концентрацию иода, то относительное изменение концентрации иодида при прохождении тока через интегратор чрезвычайно мало. Концентрация ионов трииодида в отсеках меняется под действием электрического тока в соответствии с законом Фарадея и пропорциональна количеству электричества, прошедшему между электродами интегратора. Это изменение концентрации ионов трииодида в отсеках может быть определено визуально или электрически.

Водный раствор иодистого калия представляет собой прозрачную бесцветную жидкость, а раствор иода имеет характерный бурый цвет. Изменение концентрации ионов трииодида в отсеках вызывает изменение цвета раствора. Визуальный метод определения концентрации ионов предполагает использование прозрачного материала для изготовления корпуса интегратора.

При визуальном определении количества электричества, прошедшего через интегратор, используют цветные эталоны. Ошибка определения достигает 10%. Во многих случаях эта точность является вполне достаточной. Если требуется бо́льшая точность, то концентрацию ионов можно определить, измерив концентрационную э. д. с. между электродами.

При работе интегратора благодаря изменению концентрации раствора в анодном и катодном отсеках получается концентрационный элемент, э. д. с. такого элемента зависит от разности концентраций в анодном и катодном отсеках. Если концентрация C_1 ионов трииодида в катодном отсеке меньше концентрации C_2 этих же ионов в анодном отсеке, то общая э. д. с. цепи $E_{общ}$ равна:

$$E_{общ} = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_2}{C_1},$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; Z — заряд иона; F — число Фарадея.

Таким образом, определив э. д. с., развиваемую электрохимическим интегратором, мы можем судить об изменении концентрации ионов трииодида в катодном и анодном отсеках интегратора и, следовательно, о количестве электричества, прошедшего через интегратор за исследуемый отрезок времени.

Наличие в интеграторе перегородки препятствует изменению его концентрационной э. д. с. во времени. В этом смысле интегрирующий двухполюсник обладает «памятью». Интегрирующие двухполюсники могут интегрировать и быстроменяющиеся сигналы, однако считывание концентрационной э. д. с. должно производиться через 2—3 *ч* после окончания интегрирования. Это время необходимо для выравнивания концентрации во всем объеме отсеков. При использовании интегрирующего двухполюсника нельзя считывать результат во время прохождения тока. Этого недостатка лишены многоэлектродные интеграторы.

Если в интегральный анодный отсек поместить вспомогательный электрод, то этот электрод образует с основным электродом свою электрохимическую ячейку. Так как предельный ток такой ячейки пропорционален концентрации ионов трииодида в электролите, то, если к этим электродам подвести напряжение от отдель-

ной батареи и включить в цепь микроамперметр, отклонение стрелки микроамперметра укажет на изменения концентрации этих ионов в интегральном отсеке. Микроамперметр можно калибровать непосредственно в единицах количества электричества.

Усовершенствование концентрационных интеграторов привело к другой конструкции — интегратору-тетроду (рис. 8). Интегрируемый сигнал подается на электроды *1* и *2*. Электрод *2* является

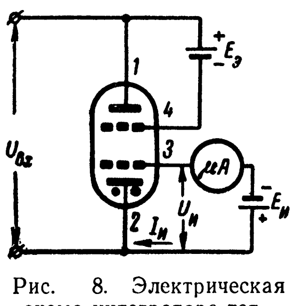


Рис. 8. Электрическая схема интегратора-тетрода.

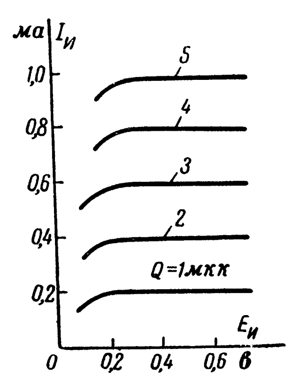


Рис. 9. Выходные характеристики интегратора-тетрода.

общим для электродов *1* и *3*, образующих с последним вспомогательную измерительную электрохимическую ячейку. Для того чтобы в этой цепи можно было измерить предельный ток, в цепь введен микроамперметр и источник постоянного напряжения. Величина подаваемого напряжения такова, что измеряемый ток является функцией концентрации ионов трииодида в пространстве между электродами *2* и *3*. Следовательно, чтобы концентрация в этом пространстве выравнивалась быстрее, необходимо чтобы расстояние между электродами было как можно меньше. Во многих конструкциях оно равно нескольким микронам.

Для уменьшения диффузии вещества из интегрального отсека вводится экранный электрод. На него подают отрицательное по отношению к электроду *1* напряжение, равное 0,5—0,7 *в*, которое обеспечивает ток в рабочей цепи, при этом весь иод, диффундирующий из резервуара, восстанавливается на этом электроде до иодида. То же самое происходит и на поверхности электрода *3*; так как расстояние между ними невелико, то малая концентрация иода на их поверхностях резко уменьшает диффузию ионов из одного отсека в другой. Электроды *3* и *4* должны быть перфорированными. Максимальное напряжение, которое подают между двумя любыми электродами, равно 0,75 *в*.

Выходные характеристики $I_и = f(E_и)$ при различных зарядах интегратора-тетрода показаны на рис. 9. Эти характеристики похожи на вольт-амперные характеристики четырехэлектродной электронной лампы. Зависимость выходного тока от времени при постоянстве тока во входной цепи показана на рис. 10.

Твердофазными интеграторами называют такие электрохимические приборы, принцип действия которых основан на изменении состояния электродов или переносе вещества электрода с одного

электрода на другой. В качестве примеров таких интеграторов можно назвать хорошо известные медные или серебряные кулонометры. Малогабаритные медные кулонометры используются в качестве счетчиков машинного времени. Другим примером твердофазного интегратора может быть электрохимическое управляемое сопротивление — мемистор (рис. 11). В этом случае электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, помещенных в раствор. Один из электродов, имеющий два вывода, называется резистивным. Он выполняется в виде тонкой проволоки или пленки родия, нанесенной на непроводящую подножку. Второй электрод — управ-

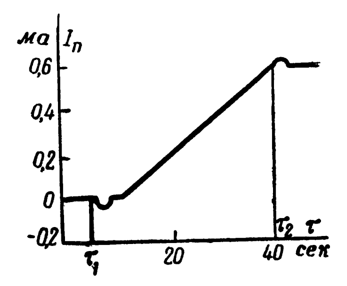


Рис. 10. Зависимость выходного тока от времени.

τ_1 — момент включения; τ_2 — момент выключения.

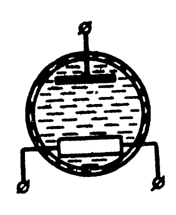


Рис. 11. Управляемое электрохимическое сопротивление — мемистор.

ляющий делается из меди. Электролитом служит раствор сернокислой меди с рядом добавок. При подаче управляющего напряжения между резистивным и управляющим электродами (плюс приложен к управляющему электроду) на резистивном электроде осаждается медь, уменьшая его сопротивление. Подача управляющего напряжения обратной полярности вызывает анодное растворение осажденной на резистивном электроде меди, увеличивая его сопротивление. Сопротивление резистивного электрода может считываться в процессе регулирования. Измерение сопротивления резистивного электрода производят на переменном токе. Обычно величина этого сопротивления меняется в пределах от нескольких ом до 100 *ом*. Такой прибор может быть достаточно дешевым, простым и иметь малые размеры. Номинальный ток управления колеблется обычно от долей миллиампера до нескольких миллиампер. Подобный элемент можно использовать не только как интегратор, но и как аналоговый элемент памяти.

ХИМОТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Электрические преобразователи предназначены для регистрации и измерения различных механических воздействий (акустических, вибрационных, динамических, сейсмических и пр.). По природе процессов, протекающих в подобных приборах, их можно разделить на две основные группы: диффузионные датчики, использующие явление конвективной диффузии, и электрокинетические датчики, работающие на основе электрокинетического эффекта.

Диффузионные датчики

На рис. 12 представлена схема диффузионного датчика механических сигналов. Он состоит из цилиндрического корпуса *1*, заполненного электролитом и снабженного двумя эластичными мембранами *4*, способными прогибаться при самом незначительном давлении. Внутри корпуса *1* располагаются два сетчатых платиновых электрода *2* (аноды). Третий, тоже платиновый, электрод *3* (катод) устанавливается в сквозном отверстии перегородки, отделяющей анодные камеры прибора друг от друга. На электроды подается напряжение от батареи, а микроамперметр регистрирует ток в выходной цепи датчика. Состав электролита в датчике примерно такой же, что и в рассмотренных ранее химотронных приборах (водный раствор иодистого калия с небольшой добавкой иода).

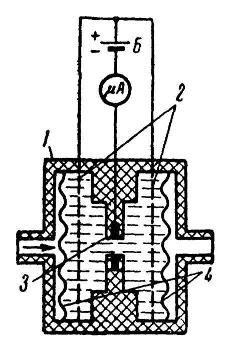


Рис. 12. Электрохимический диффузионный датчик.

Величина тока в выходной цепи датчика определяется скоростью реакции восстановления ионов трииодида на катоде. Так как содержание молекулярного иода в электролите очень невелико, то при отсутствии внешних воздействий на мембраны датчика через микроамперметр будет протекать ток 10—20 *мка*. Дело в том, что после подачи напряжения на электроды ячейки количество ионов трииодида в небольшом объеме электролита у катода быстро уменьшается, а так как поступление новых ионов трииодида к катоду, расположенному в канале, за счет диффузии сильно затруднено, в цепи будет проходить лишь небольшой фоновый ток.

Воспринимаемое эластичными мембранами внешнее воздействие вызывает движение электролита по каналу из одной камеры прибора в другую. Число ионов трииодида, поступающих к катоду из глубины раствора, при этом значительно возрастает; скорость электродного процесса и ток в выходной цепи датчика также резко увеличиваются. Так, например, если фоновый ток датчика равен 10—12 *мка*, то уже при перемещении электролита сквозь отверстие в перегородке со скоростью 0,01 *см*^{3}/*сек* ток в цепи катода возрастает до 50—60 *мка*. При движении электролита со скоростью 1,0 *см*^{3}/*сек* ток увеличивается до 300 *мка*. Рабочие напряжения для диффузионных датчиков выбираются от 0,15 до 0,9 *в*. При напряжении выше 0,9 *в* начинается необратимая реакция — электролитическое разложение воды, и датчик выходит из строя. Изменяя соотношение диаметров мембран и катодного отверстия, можно в широких пределах управлять скоростью перетекания электролита внутри прибора. Чувствительность датчика к восприятию внешнего воздействия также поддается регулировке путем изменения жесткости его эластичных элементов (мембран или сильфонов). Химотронные датчики давления обладают высокой чувствительностью: они способны регистрировать изменение давления в 10^{-6} *ат*. Не менее чувствительны они и к переменному давлению, подаваемому на любую из их мембран, причем, если подаваемый сигнал имеет симметричную форму (например, синусоидальную), полярность выходного тока датчика сохраняется неизменной и не зави-

сит от изменения направления механического сигнала во входной цепи датчика. Таким образом, он может быть использован для детектирования знакопеременных механических воздействий. Подобные приборы можно применять для измерения акустических и гидроакустических явлений, регистрации и измерения ускорения и в цепях счетно-решающих и усилительных устройств.

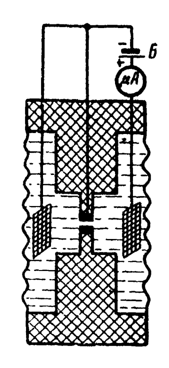


Рис. 13. Диффузионный датчик с двумя катодами.

На рис. 13 приведена несколько измененная схема включения диффузионного датчика. Этот датчик имеет два катода: основной и вспомогательный.

Если прибор не подвергается никаким внешним механическим воздействиям, то ток в цепи основного катода (последовательно с которым включен микроамперметр) будет по-прежнему очень мал, так как в неподвижном электролите он поддерживается только процессом стационарной диффузии ионов трииодида к электроду, расположенному в канале. Но в отличие от схемы на рис. 11 второй большой сетчатый платиновый электрод соединен не с плюсом, а с минусом источника тока. Следовательно, на нем будет происходить не окисление ионов трииодида, а их восстановление в ионы иода (т. е. он является вспомогательным катодом). Иными словами, в камере добавочного катода концентрация ионов трииодида после включения датчика станет убывать и практически через некоторе время упадет до нуля. Если изменить давление на мембрану анодной камеры, то электролит с высокой концентрацией ионов трииодида начнет перетекать в катодную камеру. Это, так же как и в схеме на рис. 12, приведет к значительному росту тока в цепи прибора-индикатора. Зато воздействие на мембрану катодной камеры датчика теперь уже не будет вызывать никаких изменений тока на выходе, так как в камере дополнительного катода ионов трииодида практически нет, так что перемещение электролита из катодного отсека в анодный не будет оказывать заметного влияния на скорость электродного процесса на основном катоде (весь он «омывается» теперь чрезвычайно «бедным» раствором) и сила тока в его цепи практически не меняется.

Подобные диффузионные датчики с успехом используются для измерения направленных давлений, ускорений и звукового воздействия в интервале частот от 2 до 10 *гц*.

Многочисленные исследования показали, что при увеличении гидравлического сопротивления главного катода выходные характеристики диффузионного датчика значительно улучшаются. Поэтому в некоторых конструкциях датчиков в канал главного катода помещают пористые стеклянные вкладыши или же уменьшают диаметр канала между камерами датчика до 0,3—0,5 *мм*, а сам катод выполняют из туго скрученной платиновой сетки.

В целях снижения начального фонового тока во всех конструкциях диффузионных датчиков стремятся максимально ограничить открытую поверхность катода, соприкасающуюся с электролитом и тщательно изолируют все нерабочие части электродов.

Известно много различных конструктивных и схемных вариантов электрохимических преобразователей. Из них следует отметить диффузионные датчики с двумя главными катодами. В этом случае удается использовать дифференциальную схему включения элек-

тродов, обеспечивающую компенсацию довольно значительного фонового тока, присущего остальным типам диффузионных датчиков. Последовательно с каждым катодом подключено сопротивление нагрузки. Так как потенциалы электродов, а следовательно, и начальные токи равны, то они уравновешивают друг друга и ток на выходе отсутствует. Электрический сигнал на выходе подобного датчика может возникнуть только под влиянием какого-либо внешнего воздействия, вызвавшего перетекание электролита через один из его катодов, и связанного с ним изменения концентрации ионов трииодида возле электрода.

На рис. 14 приведена упрощенная конструктивная схема диффузионного датчика с двумя катодами, обладающего логарифмической характеристикой. Прибор смонтирован в цилиндрическом пластмассовом корпусе *1*, снабженном двумя эластичными мембранами *2* и *6*. Катод *7* у него выполнен из редкой платиновой сетки с крупными ячейками. Второй катод *5* и анод *3* изготовлены из мелкоячеистой платиновой сетки. Здесь также используется окислительно-восстановительная система иод — иодид. В состоянии покоя у логарифмического датчика наблюдается лишь некоторый фоновый ток за счет стационарной диффузии. При воздействии небольшого внешнего давления на мембрану *2* в выходной цепи датчика наблюдается приращение тока. Но так как скорость потока электролита, поступающего из анодной камеры через канал *4*, также невелика, то почти все ионы трииодида успевают восстановиться на первом катоде *7* и характеристика этого датчика в начальной части мало чем отличается от характеристики обычного диффузионного датчика с одним главным катодом. С увеличением давления на мембрану *2*, когда скорость потока электролита в канале *4* возрастает, в работу «включается» второй улавливающий катод *5*, на котором будет происходить восстановление тех ионов трииодида, которые «проскочили» и не успели восстановиться на первом катоде *7*, выполненном из редкой платиновой сетки. При такой конструкции датчика удается получить логарифмическую зависимость величины выходного электрического сигнала от скорости потока электролита в очень широком диапазоне измеряемых давлений. Так, например, логарифмический датчик акустического давления марки SD10 (США) имеет следующие основные технические данные:

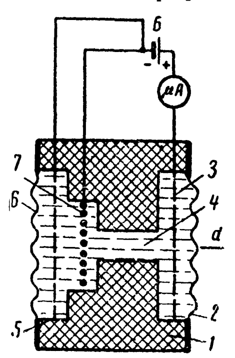


Рис. 14. Диффузионный датчик с логарифмической характеристикой.

Диаметр датчика	16 *мм*
Высота датчика	15 *мм*
Максимальное питающее напряжение	0,9 *в*
Максимальный выходной ток	1 *ма*
Остаточный (фоновый ток)	50 *мка*
Допустимый температурный диапазон	от 0 до 60 ° С
Температурная зависимость чувствительности датчика	До 2,5% на 1° С

Логарифмическая характеристика датчика сохраняется в пределах от 1 до 1 000 единиц измеряемого давления.

Частотный диапазон диффузионных датчиков не превышает 50—100 *гц*, а в ряде случаев он ограничивается 10 *гц*. Поэтому диффузионные датчики в основном применяются в устройствах, работающих только в нижней части звукового диапазона, и в инфразвуковых установках, так как нижний предел диапазона химотронных датчиков может достигать сотых и тысячных долей герца. Простота устройства, высокая чувствительность и экономичность диффузионных датчиков, безусловно, будут содействовать их широкому распространению в качестве чувствительных элементов автоматических устройств, предназначенных для регистрации, измерения и контроля медленных периодических процессов.

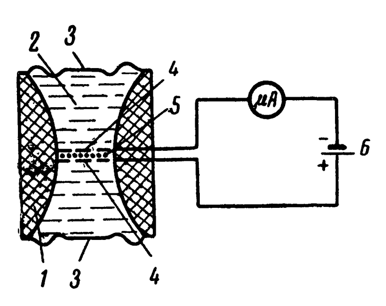


Рис. 15. Диффузионный виброметр.

На рис. 15 приведена конструктивная схема химотронного виброметра, предназначенного для измерения общего уровня вибрации работающих механизмов. Он состоит из пластмассового корпуса *1*, снабженного двумя эластичными мембранами *3*. В средней части датчика закреплены два электрода из платиновой сетки *4* с проложенной между ними стеклотканью *5*. Корпус датчика заполняется раствором *2* иод — иодида или ферри — ферроцианида калия, с которым платиновые электроды *4* образуют окислительно-восстановительную систему. К внешней цепи преобразователя подключен прибор-индикатор (микроамперметр) и источник постоянного тока.

При механических колебаниях преобразователя по направлению продольной оси цилиндрического корпуса в камерах датчика будут создаваться давления различной величины. Раствор начнет частично перемещаться из одной камеры в другую, протекая через отверстия сетчатых электродов *4* и стеклоткань *5*. Принудительная конвекция, возникающая при колебаниях корпуса датчика, приведет к значительному приращению тока в выходной цепи прибора. Чувствительность и частотная характеристика датчика определяются размерами электродов, жесткостью мембран *3* и демпфирующей способностью стеклоткани *5*. При большой величине демпфирования (степени затухания) системы за счет стеклоткани *5*, проложенной между электродами *4*, ток преобразователя имеет линейную зависимость от амплитуды и частоты исследуемых колебаний.

Опытный образец диффузионного виброметра имеет следующие технические характеристики:

Диаметр корпуса датчика	32 *мм*
Высота корпуса датчика	52 *мм*
Вес	50 *г*
Частотный диапазон	10—200 *гц*
Наибольшая мощность потребляемая датчиком	0,005 *вт*
Погрешность измерения при колебаниях окружающей температуры от 0 до 60 °С	не более 15%

Кроме описанных выше датчиков, снабженных эластичными мембранами, разработано довольно много различных диффузионных преобразователей слабых механических воздействий, в конструкции которых мембраны отсутствуют. Таким преобразователем является электрохимический резонансный вибродатчик. Он обладает повышенной чувствительностью в узком диапазоне частот, вследствие того что один из его электродов установлен на свободном конце консольно укрепленного в датчике упругого элемента, например стержня с определенной частотой собственных колебаний.

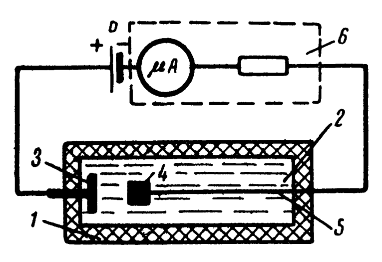


Рис. 16. Электрохимический резонансный вибродатчик.

На рис. 16 показано схематическое устройство подобного датчика. Корпус *1* из электроизоляционного материала заполнен электролитом *2*, образующим вместе с электродами *3* и *4* обратимую окислительно-восстановительную систему. Анод *3* жестко закреплен в корпусе, а катод *4* расположен на свободном конце упругого элемента *5*, который выполнен в виде отрезка металлической проволоки, покрытой слоем изоляции, предохраняющей упругий элемент от электрического контакта с электролитом.

При вибрации корпуса вибродатчика с частотой, равной частоте свободных колебаний упругого элемента, последний проявляет резонансные свойства и сильно увеличивает амплитуду своих колебаний, при этом катод перемещается относительно раствора, что улучшает условия подвода ионов к катоду и приводит к увеличению тока во внешней цепи, состоящей из источника постоянного тока и нагрузки *6*. Изменение величины тока при резонансе может достигать 10—20-кратного значения по отношению к начальному.

Применяя различную концентрацию электролита, а также изменяя размеры катода и упругого элемента, можно получить электрохимические вибродатчики с разными токовыми и частотными характеристиками.

На рис. 17 приведена конструктивная схема безмембранного диффузионного тахометра насосного типа. В цилиндрическом пластмассовом корпусе *1* с перегородкой *2* установлен пластмассовый ротор *3* с запрессованным в него постоянным магнитом *4*. Корпус прибора заполняется электролитом, образующим вместе с электродами (анодом *7* и катодом *8*) окислительно-восстановительную систему. К выходной цепи прибора подключен источник питания *9* и прибор-индикатор *10* с шунтирующим резистором *11*. При враще-

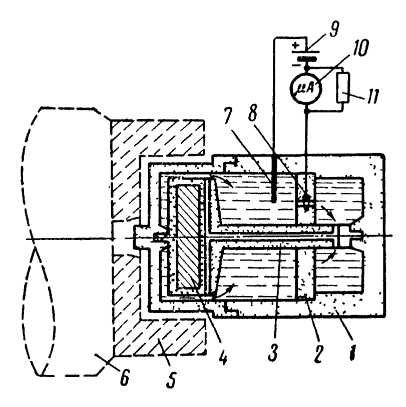


Рис. 17. Диффузионный тахометр.

нии вала измеряемого объекта *6*, снабженного двухполюсной стальной насадкой *5*, ротор тахометра *3* также приходит во вращение из-за магнитной связи насадки *5* с постоянным магнитом *4*, запрессованным в ротор тахометра. Ротор, вращаясь, заставляет электролит циркулировать внутри корпуса прибора. Поскольку скорость движения электролита в приборе находится в прямой зависимости от скорости вращения ротора, а величина выходного тока в цепи катода *8* имеет ту же зависимость от величины потока жидкости, проходящего через канал, то шкала прибора-индикатора *10* будет линейной и ее можно проградуировать непосредственно в единицах измерения скорости вращения.

Отмечая несомненные положительные качества различных диффузионных химотронных датчиков, в первую очередь простоту их устройства, экономичность и высокую чувствительность (химотронные «детекторы прикосновения» реагируют на смещение мембраны менее 1 *мк*), следует остановиться также на свойственных им недостатках. К таковым относится невозможность использования большинства датчиков для длительного измерения постоянных потоков, давления и перемещения из-за ограниченного объема электролита в его камерах. Кроме того, они имеют довольно значительную величину температурной зависимости выходных характеристик (2—3%). Для уменьшения влияния температуры на точность измерений применяют термостатирование или температурную компенсацию химотронных датчиков с помощью термисторов или полупроводниковых приборов. В некоторых устройствах используют мостовые измерительные схемы с двумя одинаковыми диффузионными датчиками, один из которых работает как компенсатор.

Для питания химотронных датчиков как и эталонных приборов чаще всего используют гальванические элементы, снабженные потенциометрическим делителем напряжения. В США для этой цели разработан специальный щелочной серебряно-свинцовый аккумулятор с э. д. с. около 0,9 *в*.

При изготовлении химотронных диффузионных датчиков очень большое значение имеет правильный выбор для каждого конкретного случая наивыгоднейших конструкционных материалов и соответствующего электролита. Особое внимание обращают на чистоту применяемых материалов. Растворитель и соли, используемые для изготовления электролита, подвергаются многократной очистке (растворитель путем повторной перегонки, а соли с помощью перекристаллизации). Корпусы химотронов с вмонтированными в них электродами тщательно очищают, обезжиривают и промывают перед заливкой электролитом. Сам электролит обязательно должен быть обезгажен — из него удаляют растворенный кислород. Для производства корпусов химотронных приборов применяют стекло, фторопласт-3, полиэтилен, полипропилен и некоторые другие инертные пластические материалы. В качестве материала для электродов, кроме платины, используют также другие благородные металлы, например иридий, палладий, родий или сплавы этих металлов и платины. Можно применять также электроды из пиролитического углерода.

В настоящее время ведутся многочисленные исследования и поиски новых обратимых окислительно-восстановительных систем и органических растворителей, которые позволили бы еще более повысить технические показатели химотронных диффузионных дат-

чиков и расширить круг их применения в современных системах автоматики и контроля. Одновременно ведется большая работа по дальнейшей микроминиатюризации химотронных приборов, по использованию в них проводящих полимерных пленок и других материалов.

Электрокинетические преобразователи

Принцип действия электрокинетических датчиков основан на использовании некоторых явлений в жидкостях (потенциал течения, электроосмос). Подобные явления можно наблюдать при протекании полярных жидкостей (воды, ацетона, этилового спирта и др.), обладающих очень небольшой электропроводностью, через отдельные капиллярные трубки или пористые перегородки. Датчики, построенные на этом принципе, способны непосредственно преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот.

На рис. 18 изображено устройство так называемого электроосмотического элемента. По своей конструкции он несколько напоминает диффузионный датчик давления. Но в отличие от него камеры в электроосмотической ячейке разделяет пористая перегородка *3*. Электроды *2* прибора *1* изготовлены из серебра, платины, сплавов алюминия или других металлов. Пористой перегородкой служит стеклянный фильтр *3* (из спеченного стеклопорошка), а в качестве рабочей жидкости может использоваться дистиллированная вода. Подача электрического сигнала на электроды такого химотронного элемента вызовет перетекание воды через пористую перегородку, разделяющую его камеры. Работу такого электроосмотического элемента можно сравнить с микронасосом, перекачивающим жидкость из одной камеры в другую. Скорость перетекания жидкости и соответственно величина гидростатического давления на мембрану могут меняться в довольно широких пределах. Это зависит от рода рабочей жидкости, материала пористой перегородки, ее толщины и площади. Наиболее существенным является то, что поток жидкости, возникающий под влиянием приложенного к электродам ячейки напряжения, находится в линейной зависимости от величины напряжения. Отсюда следует, что и гидростатическое давление на мембрану в электроосмотическом элементе также будет пропорционально величине напряжения, приложенного к его электродам.

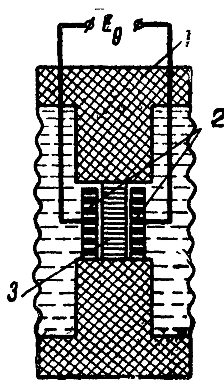


Рис. 18. Электроосмотическая ячейка — микронасос.

Электрокинетические преобразователи электрической энергии в механическую (давление жидкости) отличаются простотой конструкции, отсутствием механически изнашивающихся частей. Обладая огромным входным сопротивлением (десятки мегом), они могут найти весьма широкое применение в автоматике и измерительной технике как самостоятельные элементы или в комбинации с другими химотронными приборами.

На рис. 19 приведено схематическое устройство электроосмотического вольтметра. Заполненный полярной жидкостью (например, дистиллированной водой или ацетоном) пластмассовый корпус *1* разделен пористой перегородкой *3* на две камеры, сообщающиеся друг с другом с помощью П-образного капилляра *4*. При подаче напряжения на электроды *2* начнется перетекание полярной жидкости из одной камеры в другую и изменение в них гидростатического давления. Следовательно, происходит изменение начального уровня воды *5* в П-образном капилляре. Рост уровня жидкости в правом плече капилляра будет происходить до тех пор, пока поток жидкости через пористую перегородку, создаваемый электроосмосом, не станет равным потоку обратного направления, возникшего в результате разности гидростатических давлений в плечах капилляра.

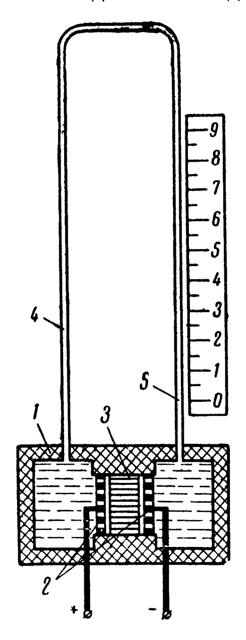


Рис. 19. Электроосмотический вольтметр.

Электроосмотическое устройство подобной конструкции можно использовать для непосредственного измерения напряжения. Чем больше напряжение на его входе, тем выше поднимается столбик жидкости в правом колене П-образной трубки. Такой вольтметр очень прост. При изменении напряжения на входе прибора от 0 до 100 *в* уровень жидкости изменяется на 100 *мм*.

Электроосмотический вольтметр можно использовать и для измерений в цепях переменного тока низкой частоты. Для этого нужно последовательно с ним включить выпрямительный элемент. С небольшими изменениями подобный прибор может выполнять роль высокоомного реле времени, сигнального устройства и пр. Следует отметить, что материал рабочих электродов электроосмотического вольтметра, как и прочих электроосмотических приборов, рассчитанных на длительную работу в цепях постоянного тока, должен быть по возможности менее подвержен поляризации.

Различного рода реле, предназначенные для включения или переключения электрических цепей с помощью электрического сигнала, являются важнейшими элементами автоматических устройств. Наибольшее распространение получили электромагнитные реле, преобразующие сигнал управления в магнитное поле, под воздействием которого подвижный ферромагнитный якорь коммутирует контакты исполнительной цепи. Недостатками указанных реле являются сложность устройства, большие габариты и вес, невысокое входное сопротивление и наличие у них ряда подвижных механических элементов, подверженных износу.

На рис. 20 приведена конструктивная схема электроосмотического реле. Пластмассовый корпус *1* заполнен дистиллированной водой или другой полярной жидкостью. Он разделен на две камеры пористой перегородкой *2*. В камерах, закрытых эластичными мембранами *4*, устанавливаются сетчатые серебряные электроды *3*,

плотно прилегающие к пористой перегородке 2. Контактное устройство реле смонтировано в небольшой дополнительнй камере 5, заполненной ртутью 6. Два металлических контакта 7 установлены в ее верхней части.

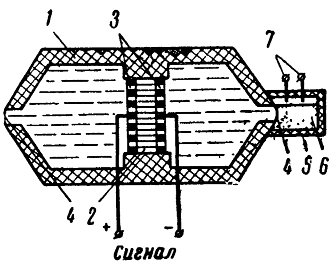


Рис. 20. Электроосмотическое реле.

Работа электроосмотического реле происходит следующим образом: при воздействии электрического сигнала, поданного на электроды 3, произойдет перемещение воды из одной половины электроосмотической ячейки в другую. Следствием этого явится увеличение объема жидкости в правой (на рисунке) камере прибора и появление в ней гидростатического давления на мембрану 4. Деформация мембраны вызовет в свою очередь повышение уровня ртути в камере 5 и последующее замыкание цепи контактами 7. Возможны и другие конструктивные исполнения электроосмотических реле. Так, например, его можно дополнить второй контактной группой, работающей на размыкание. Для этого на другом конце корпуса (на рис. 20 слева) монтируют вторую ртутную камеру, подобную камере 5, с двумя контактами, погруженными в ртуть. Тогда при подаче напряжения на электроды 3 одновременно с повышением уровня ртути в правой камере будет происходить падение уровня ртути в левой камере, сопровождающееся размыканием погруженных в нее контактов. При необходимости ртутные камеры 5 могут быть герметизированы или заполнены инертным газом. Их можно выполнять в виде капиллярных трубок с впаянными контактами для улучшения чувствительности реле и уменьшения времени его переключения. Одновременно улучшаются и эксплуатационные характеристики реле, так как оно становится малочувствительным к тряске и ускорению и может быть использовано на подвижных объектах. В электроосмотических реле можно в широких пределах изменять величину задержки времени при срабатывании. Это достигается включением в сигнальную цепь соответствующих ячеек, обладающих нужной постоянной времени, подбором материала и толщины упругих мембран, а также регулировкой начального расстояния между поверхностью ртути и контактами в камерах.

Следует отметить следующие основные достоинства электроосмотических реле: простота конструкции, небольшие габариты и вес, бесшумность работы, высокое входное сопротивление (от $2 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^7$ *ом* и выше в зависимости от расстояния между электродами и рода примененной рабочей жидкости), чувствительность к слабым сигналам постоянного тока. Обратимость электрокинетических преобразователей позволяет использовать их для измерения давления, различных перемещений и смещений, в гидрофонах, акселерометрах и пр.

На рис. 21 приведена конструктивная схема электрокинетического углового акселерометра. Он обеспечивает возможность измерения как постоянного, так и переменного углового ускорения в широком интервале частот. Подобные акселерометры нечувствительны к давлению, причем воздействие углового ускоре-

ния может быть любым, кроме совпадающего с осью прибора. Акселерометр представляет собой тороидальный стеклянный корпус 1 с пористой стеклянной перегородкой 2. Корпус заполнен полярной жидкостью, в которой имеется небольшой пузырек воздуха 3 или инертного газа для термокомпенсации различных коэффициентов расширения корпуса прибора и жидкости. Наполнение жидкостью производится через отверстие 4, которое затем закрывается пробкой 5. Электродами 6 служат диски из тонкой алюминиевой сетки, плотно поджатые к пористой перегородке 2. Для термокомпенсации в приборе применен терморезистор 7, подключенный параллельно выводам прибора.

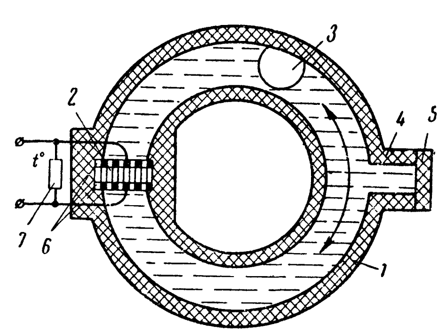


Рис. 21. Электрокинетический угловой акселерометр.

При работе акселерометра угловое ускорение корпуса 1 вызывает соответствующее перетекание жидкости через перегородку 2. При прохождении рабочей жидкости через пористую перегородку под влиянием давления, являющегося результатом углового ускорения корпуса 1 относительно его оси, на электродах 6 возникает пропорционально прилагаемому давлению разность потенциалов (потенциал течения). Если по условиям работы требуется повышенная чувствительность прибора, то корпус для акселерометра может быть изготовлен в виде многовитковой полой спирали с соединенными концами.

Достоинство данного акселерометра — возможность использования его для измерения как постоянного, так и переменного углового ускорения в широком интервале частот. В тех случаях, когда направление вращения прибора относительно его оси будет переменным, поток жидкости любое число раз может менять направление своего течения, под влиянием давления, возникающего при угловом ускорении и перемещении корпуса 1 относительно его оси.

Существует довольно большое число разных электроосмотических датчиков, реагирующих на колебания в направлении оси корпуса прибора, или на давление, приложенное к эластичной мембране; они характеризуются широким частотным диапазоном (от долей герц до нескольких килогерц). При конструировании таких датчиков большое значение имеет выбор электрокинетической пары (пористая перегородка — рабочая жидкость). Для пористых перегородок обычно используют стеклянные фильтры, фарфор, пластмассы и некоторые другие материалы. Иногда для этой цели применяют насыпные материалы (например, кварцевый песок). В описанных электроосмотических элементах большое распространение получила пара ацетонитрил — фарфор. Датчики с этой парой сохраняют работоспособность в широком диапазоне температур — от —40 до +30° С. В тех случаях, когда рабочей жидкостью служит вода, ее обязательно подвергают многократной перегонке и тща-

тельной очистке; только при этом условии удается обеспечить достаточно высокую чувствительность датчика.

Все электродные материалы, применяемые в электрокинетических преобразователях, обязательно должны быть инертны к рабочей жидкости. В датчиках с ацетонитрилом используют алюминиевые или серебряные электроды, в воде — серебряные и платиновые. Сконструированы датчики и без металлических электродов. В них используются графитированные пористые перегородки, а токоотвод осуществляется через внутренние полости элемента, также покрытые графитом.

Хорошо сконструированные электрокинетические датчики сохраняют линейность частотной характеристики от 0,01 *гц* до 10 *кгц* и более. Они позволяют регистрировать сигналы, отличающиеся по величине на несколько порядков. Так, в литературе описан датчик смещений чувствительностью 3,25 *мв/мм* с низкочастотным пределом 0,036 *гц*, обладающий внутренним сопротивлением 100 *ком*. Другой электрокинетический акустический датчик имеет линейную характеристику в диапазоне амплитуд звукового давления от 0 до 100 $н/м^2$ и частот в диапазоне от 0,01 *гц* до 5 *кгц*. Чувствительность датчика около 40 $мкв \cdot н^{-1} \cdot м^2$, внутреннее сопротивление 5 *Мом*. Описан также электрокинетический акселерометр линейных ускорений с чувствительностью 500 *мв/g*, работающий в диапазоне от 0,5 до 1 000 *гц*. Другое химотронное устройство подобного рода позволяет измерять ускорения в диапазоне 0,01—1 000 *g* при частоте от 3 до 3 000 *гц*.

ХИМОТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Комбинированные усилители и умножители электрических сигналов

Известны более сложные, чем описанные выше, системы, состоящие из нескольких химотронов. К ним относится усилитель электрических сигналов, упрощенная конструктивная схема которого приведена на рис. 22. В общем цилиндрическом корпусе объединены два ранее описанных химотрона: электроосмотическая ячейка *1* и электрохимический диффузионный датчик давления *2*. Механическая связь между ними осуществляется с помощью общей эластичной мембраны *3*. Под воздействием электрического сигнала, поданного на электроды микронасоса *1*, начинается перекачка жидкости через пористую перегородку прибора. Возникает избыточное давление в камере ячейки, соприкасающейся с мембраной *3*, и связанное с этим движение раствора в камерах датчика *2*. Нам уже известно, что чем интенсивнее движение электролита через сквозной канал, соединяющий камеры диффузионного датчика, тем больше новых молекул подводится к его катоду, тем выше скорость электродного процесса на нем. В результате ток, проходящий через резистор $R_н$, также увеличивается. При соответ-

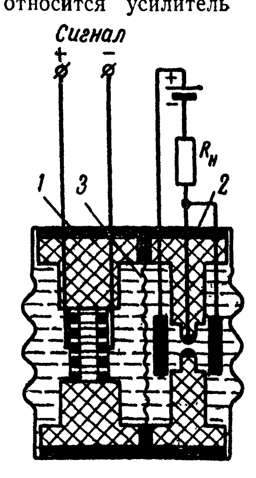


Рис. 22. Химотронный усилитель.

ствующей конструкции диффузионного датчика *2* на нагрузочном резисторе $R_н$ можно получить выходную мощность около 10 *мвт*. Коэффициент усиления данного устройства достигает 330, что не является пределом. Следует отметить также возможность конструирования многокаскадных химотронных усилителей подобного типа.

Химотронный умножитель

Химотронные приборы с успехом могут применяться в качестве математических элементов различных автоматических систем. На рис. 23 приведена упрощенная конструктивная схема комбинированного диффузионно-электроосмотического умножителя, несколько напоминающая рассмотренный выше химотронный усилитель. Этот прибор состоит из электроосмотического микронасоса *1*, используемого для ввода «множителя» в устройство диффузионного умножителя *2*, и общей разделительной эластичной мембраны *3*, установленной между ними. Диффузионный умножитель *2* отличается от ранее разобранных электрических диффузионных приборов тем, что анод и управляющий катод у него помещены в общем плоском канале, соединяющем камеры прибора. Если при отсутствии давления на мембрану *3* на электроды диффузионного преобразователя будет подан электрический сигнал (*Сигнал 1*), то на управляющем катоде произойдет восстановление ионов трииодида, а на аноде — окисление ионов иодида. Концентрация ионов трииодида в канале будет определяться напряжением (*Сигнал 1*), приложенным к электродам, расположенным в канале прибора. Так как окислительно-восстановительный процесс будет происходить только внутри плоского канала очень небольшого сечения, исключающего возможность конвективного движения электродов, ионы трииодида за пределы канала выйти не смогут и ток в цепи второго измерительного катода прибора практически будет равен нулю. Однако если на электроды микронасоса *1* также подать какой-то электрический сигнал (*Сигнал 2*) соответствующей полярности, то начнется перетекание рабочей жидкости из левой камеры в правую, а возникшая при этом деформация мембраны *3* в свою очередь вызовет движение электролита внутри диффузионного преобразователя. Известно, что скорость движения электролита в канале диффузионного преобразователя растет пропорционально давлению и, следовательно, будет тем выше, чем больше напряжение, питающее микронасос. При этом часть ионов трииодида, образующихся на аноде, выносится частичками электролита, движущимися через плоский канал с элек-

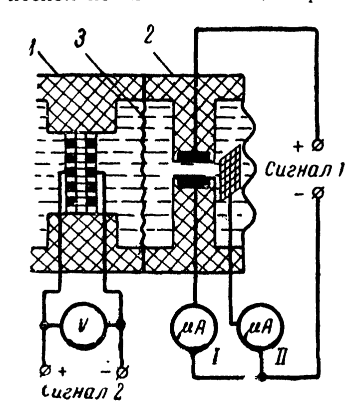


Рис. 23. Химотронный умножитель.

тродами, и восстанавливается на втором измерительном катоде. Следствием этого будет перераспределение тока в цепях управляющего и измерительного катодов (снизится ток в цепи микроамперметра *I* и второй микроамперметр зарегистрирует некоторый ток). Ток в цепи измерительного катода будет пропорционален скорости движения потока жидкости в канале преобразователя, возникающего при работе микронасоса, и давлению, действовавшему на мембрану *3*.

Ток в цепи измерительного катода численно равен произведению входного тока (*Сигнал 1*) на входное напряжение (*Сигнал 2*). Так, например, при напряжении на электродах микронасоса 0,2 *в* ток в цепи измерительного катода прибора достигнет 5 *мка*. С повышением напряжения на выходе микронасоса в 2 раза (до 0,4 *в*) ток в цепи измерительного катода также возрастет в 2 раза (до 10 *мка*). Такой же эффект получится от увеличения входного тока (*Сигнал 1*) в 2 раза (при постоянном напряжении на электродах микронасоса). Другими словами, микроамперметр *II* будет все время показывать произведения двух входных сигналов: тока *Сигнала 1* (множимое) на напряжение *Сигнала 2* (множитель).

Комбинированный диффузионно-электродинамический усилитель

Электрохимические способы усиления слабых электрических сигналов имеют существенные преимущества перед другими методами, заключающимися в малом дрейфе нуля и способности усиливать самые малые сигналы. Однако в подобных усилителях ток устанавливается очень медленно.

Описываемый химотронный усилитель имеет время установления тока на порядок меньше, чем триодные и тетродные химотронные усилители.

Конструктивная схема усилителя приведена на рис. 24. В тороидальном пластмассовом корпусе *1* с замкнутым кольцевым каналом, разделенным перегородкой, установлен катод *4* со сквозным отверстием небольшого диаметра. Кроме того, внутри тороида установлены два электрода из платиновой фольги *2* и два анода *3*. Внутренняя полость корпуса заполняется электролитом, образующим с электродами окислительно-восстановительную систему (например, платиновые электроды раствор иод — иодида). В отверстии тороидального корпуса установлен цилиндрический постоянный магнит *7*, снабженный дисковыми полюсными наконечниками *8*. К электродам *3* и *4* подключены источник питания *6* и сопротивление нагрузки *5*. Выводы электродов *2* подключены к зажимам *9*, являющимся входом усилительного устройства. Работает усилитель следующим образом: при отсутствии

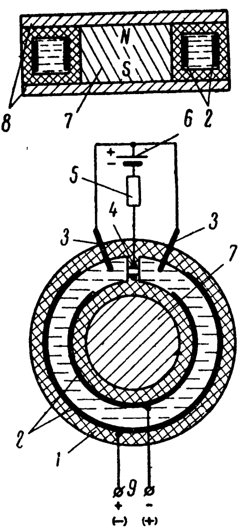


Рис. 24. Диффузионно-электродинамический усилитель.

электрического сигнала на зажимах *9* и электродах *2* электролит в канале тороидального корпуса *1* неподвижен и через сопротивление нагрузки *5* проходит лишь небольшой фоновый ток, обусловленный диффузионным процессом. При подаче напряжения на вход усилительного устройства вследствие электропроводности жидкости, заполняющей внутреннюю полость корпуса *1*, и ввиду того, что магнитные силовые линии пересекают линии тока, прибор превращается в своеобразный электромагнитный двигатель, где роль ротора выполняет электролит. Движение электролита и протекание его через канал с кольцевым катодом *4*, как известно, в подобных устройствах сопровождается значительным приращением выходного тока прибора. Скорость движения электролита, который в данном случае аналогичен проводнику с протекающим по нему током, помещенному в постоянное магнитное поле, будет прямо пропорциональна величине напряжения, приложенного к зажимам *9*. Таким образом, в этом усилительном устройстве входной и выходной ток связаны линейной зависимостью.

Достоинствами такого химотронного усилителя являются сравнительная простота устройства и меньшее время установления тока, чем в других аналогичных усилителях, а его отличительная особенность — использование электромагнитных сил для перемещения электролита в электрохимической ячейке.

Трехэлектродный усилительный элемент

Принцип действия этого усилительного электрохимического элемента основан на использовании зависимости предельного тока диффузии от средней концентрации раствора при воздействии электрического поля управляющего электрода. На рис. 25 изображено схематическое устройство электрохимического усилительного триода. В герметическом пластмассовом корпусе *1*, заполненном электролитом, размещена система, состоящая из трех электродов. Расстояние между рабочими поверхностями общего *2* и выходного *3* электродов не должно превышать 0,1 *мм*. Входной же электрод *4* помещен на расстоянии, превышающем 0,5 *мм*, от рабочих поверхностей электродов *2* и *3*. Это позволяет сделать выходную характеристику усилительного элемента линейной. Электролитом служит раствор ферри-ферроцианида калия, образующий с платиновыми электродами прибора обратимую окислительно-восстановительную систему. При этом в электролите концентрация окислительной формы ионов должна быть меньше концентрации восстановленной формы ионов.

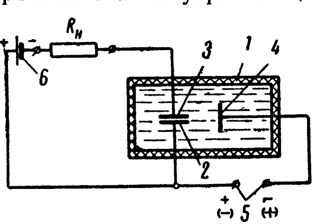


Рис. 25. Электрохимический усилительный триод.

Входные сигналы, подлежащие усилению, подаются на зажимы *5*. Напряжение от источника постоянного тока *6* подается на электроды *2* и *3*. При отсутствии электрического сигнала на входных зажимах *5* через резистор $R_н$ проходит некоторый начальный ток, определяемый исходной концентрацией окисленной формы ионов в электролите. При подаче сигнала на вход концентрация окисленной формы ионов между электродами *2* и *3* повышается или убы-

вает в зависимости от полярности напряжения. В соответствии с этим ток, проходящий через сопротивление нагрузки, возрастает или убывает одновременно с изменением предельного тока диффузии, проходящего между электродами *2* и *3*. При такой схеме прибора обеспечивается одновременное протекание двух процессов между электродами *2* и *3*: окисление (или восстановление) ионов и диффузия окисленной формы ионов. В результате установления динамического равновесия концентрация окисленной формы ионов между электродами *2* и *3* становится постоянной, линейно зависящей от величины входного сигнала.

Прибор имеет очень небольшие габариты и вес (около 5 *г*). Крутизна характеристики у него не хуже 10 *ма/в* при температурной зависимости не более 2% на 1° С. Частотный диапазон усилительного элемента находится в пределах 0—0,1 *гц*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В брошюре рассмотрена лишь небольшая часть современных химотронных приборов, принципы действия которых основаны на использовании некоторых электрохимических явлений. В настоящее время разработаны многочисленные электрохимические устройства, предназначенные для восприятия внешних воздействий, переработки и хранения информации, усиления, генерирования и детектирования электрических колебаний.

Благодаря своей простоте, дешевизне, менее высоким требованиям к конструктивным материалам (по сравнению с полупроводниковыми приборами), небольшим габаритам и весу химотронные приборы, безусловно, имеют широкие перспективы для дальнейшего развития и внедрения в различные устройства автоматики, измерительной техники, в системы контроля и управления технологическими процессами. Они также являются хорошим дополнением к электровакуумным и полупроводниковым приборам. Особенно перспективно использование их в технике инфразвуковых частот, биологических исследованиях, везде, где приходится иметь дело с медленно изменяющимися во времени процессами. В сочетании с полупроводниковыми приборами химотроны позволяют значительно улучшить технические характеристики многих низкочастотных и инфразвуковых устройств. Следует указать также на возможность создания на базе отдельных химотронов, основанных на использовании различных электрохимических закономерностей, комбинированных приборов для преобразования энергий различного рода. Многообещающим является также возможность создания термостойких приборов с электродной системой, помещенной в расплав солей, которые могут работать при очень высокой температуре окружающей среды (500° С и выше).

Очевидно, что химотронные приборы получат широкое распространение при конструировании различных самонастраивающихся и самообучающихся систем, а также станут одним из важнейших приборов в бионике.

ЛИТЕРАТУРА

И. В. Стрижевский и Л. А. Соколов, Химотронные приборы и возможности их применения, Сб. трудов Академии коммунального хозяйства РСФСР, вып. 4, 1960, стр. 126—155.

А. Н. Фрумкин и П. Д. Луковцев. Химотроника — соратница электроники, «Наука и жизнь», 1963, № 6, стр. 12—14.

В. А. Ломанович и Л. А. Соколов, Химотроны, «Радио», 1963, № 12.

М. М. Некрасов Микроминиатюризация и микроэлектроника на нелинейных сопротивлениях, «Советское радио», 1965, стр. 27—34.

В. А. Ломанович, Химотроника, «Знание», 1965, вып. 22, серия Техника.

Г. Я. Воронков, М. А. Гуревич, В. А. Федорин, Хемотронные устройства (электрохимические преобразователи), ВНИИЭМ, 1965.

В. С. Боровков, Б. М. Графов, А. А. Новиков, М. А. Новицкий, Л. А. Соколов, Электрохимические преобразователи информации, «Наука», 1966.

СОДЕРЖАНИЕ

Ломанович Виктор Александрович,
Стрижевский Иосиф Вениаминович

Химотронные приборы

Редактор *В. С. Боровков*
Обложка художника *Н. Т. Ярешко*
Технический редактор *Л. И. Гаврилина*
Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 20/X 1967 г.
Подписано к печати 17/I 1968 г. Т-00222
Формат 84×108$^1/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 1,68 Уч.-изд. л. 2,2
Тираж 40 000 экз. Цена 9 коп. Зак. 569
Издательство „Энергия". Москва, Ж-114,
Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Цена 9 коп.